肉用绵羊常用粗饲料有效能值的预测与方程的建立

赵明明[1,2] 杨开伦[1] 马 涛[2] 马俊南[2] 毛建红[2] 赵江波[2] 邓凯东[3] 刁其玉[1,2*]

（1. 新疆农业大学动物科学学院，乌鲁木齐 830052；2. 中国农业科学院饲料研究所，农业部饲料生物技术重点实验室，北京 100081；3. 金陵科技学院动物科学与技术学院，南京 210038）

摘 要:本试验旨在应用套算法分析肉用绵羊常用10种粗饲料的概略养分含量对其有效能值及消化率的影响，基于概略养分含量建立粗饲料代谢能(ME)及营养物质消化率的预测模型。采用消化代谢试验和呼吸代谢试验结合套算法测定 10 种常用粗饲料的营养物质消化率、消化能（DE）及 ME，在分析各种原料概略养分含量、消化率、DE 和 ME 的基础上，筛选出最佳预测因子并建立有效能值预测方程。结果表明：单一粗饲料各营养物质消化率、有效能值存在显著性差异（P<0.05）。单一粗饲料干物质（DM）、有机物（OM）、总能（GE）、粗蛋白质（CP）、中性洗涤纤维（NDF）的消化率与其 DM、OM、GE、CP 含量均呈极显著正相关（P<0.01），与其 NDF、酸性洗涤纤维（ADF）含量呈极显著负相关（P<0.01）。DE 和 ME 与其 DM、OM、GE、CP 含量均呈极显著正相关（P<0.01），而与其 NDF 和 ADF 含量呈极显著负相关（P<0.01）。综合得出，可以通过概略养分预测粗饲料营养物质消化率，能量消化率（ED）的预测方程为：ED（%）=99.013+9.588GE+0.157CP-0.457ADF-1.981OM-0.213NDF（R^2=0.974，n=60，P<0.01)。可以通过概略养分预测粗饲料有效能值,随着预测因子的增加，方程精确性有所提高，ME 的预测方程为：ME（MJ/kg）=-6.943-0.101NDF+0.704GE-0.101ADF+0.138OM+0.032CP（R^2=0.994，n=60，P<0.01）。

关键词：代谢能；肉用绵羊；粗饲料；预测方程

中图分类号：S826

我国反刍动物粗饲料种类繁多，来源广泛。但其营养价值差异很大，为了提高饲料的利用率，优化饲粮配方，降低饲养成本，充分发挥反刍动物理想的生产性能，饲粮的营养价值进行科学准确的评定是非常必要的。而饲粮的营养价值评定是指测定饲粮中的概略养分含量并评价这些营养物质被动物本身消化吸收的效率及对动物的营养效果。但由于反刍动物自身

收稿日期：2016-03-03

基金项目：秸秆饲料生物转化技术研究与示范（20120304202）；国家肉羊产业技术体系（CARS-39）；绵羊甲烷排放的粪便反射特征光谱研究（41475126）

作者简介：赵明明(1988—)，女，河南西平人，硕士研究生，研究方向为动物生理与营养。E-mail: 714496904@qq.com

*通信作者：刁其玉，研究员，博士生导师，E-mail: diaoqiyu@caas.cn

27 特殊的瘤胃结构与饲粮种类的多样性使得单个饲粮的消化率和有效能值的评定异常困难。目
28 前，尽管肉羊的的饲养发展很快，但有关肉羊的营养研究却远远赶不上生产发展的需要，我
29 国目前还没有比较科学、完善的肉羊粗饲料原料数据库。代谢能(ME)是欧、美、澳各国普
30 遍采用的能量评价指标，但开展饲料 ME 的评价费时费力，对每一种粗饲料 ME 一一测定也
31 不现实，因此通过动物消化代谢和呼吸代谢试验准确测定粗饲料的相关营养参数，建立一套
32 快速、准确、简便的评价 ME 预测模型是非常有必要的。本团队在前期对反刍动物粗饲料
33 ME 有一定的研究，赵明明[1]发现在采用直接法与套算法测定单一粗饲料 ME 时无显著性差
34 异，并得出套算法测定羊草 ME 时最佳的替代比例为 20%。NRC（2012）[2]对饲料原料能值
35 的进一步修订说明了能值在动物饲粮配制中的重要性，国内外学者在饲料 ME 的间接预测
36 （算）以及直接测定方面进行了大量的研究，然而多集中于单胃动物能值的预测。桓宗锦[3]
37 采用套算法测定了肉鸡玉米和豆粕的净能并以营养物质或 ME 建立了预测模型；李婷婷[4]
38 采用强饲法利用蛋种公鸡完成了对玉米干酒糟及其可溶物（DDGS）营养价值的快速预测，
39 通过化学成分建立 ME 预测方程；刘德稳[5]、Huang 等[6]通过套算法测定猪常用的饲粮原料
40 概略养分含量，并建立原料 ME 的预测方程。而在反刍动物领域，大多采用体外法、半体内
41 法通过营养物质的体外消化率、24 h 产气量（$GP_{24\ h}$）以及不同化学成分建立原料 ME 的预
42 测模型[7]。陶春卫[8]利用粗饲料的化学成分以及康奈尔净碳水化合物—净蛋白质体系
43 （CNCPS）指标，与体外法结合建立了粗饲料 ME 预测模型，并运用套算法体内实测 ME
44 验证模型准确性，表明模型能够运用于实践；何亭漪[9]建立了通过营养成分分析、半体内法、
45 体外产气法评定单一粗饲料 ME 的回归公式；刘洁[10]采用体内法对配合饲粮的 ME 做了实
46 测，并建立了配合饲粮中营养成分为预测因子的 ME 预测模型，所得结果对于配合饲粮中
47 ME 的预测具有客观性和实用性。现有的采用体内法实测 ME，建立的这些配合饲粮的有效
48 能值的预测模型未必适用于单一的饲料原料，因此有必要对粗饲料 ME 预测及对其预测模型
49 进行探究。本试验以我国常用的 10 种粗饲料为试验材料，以体重为 45.0 kg 的杂交肉用羯羊
50 为试验动物，采用消化代谢和呼吸代谢结合套算法实测各种饲粮概略养分含量和不同营养物
51 质的体内消化率并计算 10 种原料的 ME。目的在于建立粗饲料有效能值预测模型，以达到
52 快速、简单且有效预测粗饲料的消化率、消化能（DE）和 ME 的目的。这对建立我国肉用
53 绵羊原料营养价值体系，合理利用饲料资源都具有十分重要的意义。

54 ## 1 材料与方法

55 ### 1.1 试验动物及试验设计

56 动物消化代谢试验和呼吸代谢试验于中国农业科学院南口中试基地进行。样品分析试验

57 在中国农业科学院饲料研究所家畜营养与饲料研究室进行。试验选用初始重为(45.0±1.96)

58 kg 的体况良好的杜泊×小尾寒羊 F1 代 18 月龄杂交肉用羯羊 66 只，分为 11 个处理，每个

59 处理 6 个重复，每个重复 1 只羊，每个处理单独圈养于不锈钢羊栏（3.2 m×0.8 m）中。

60 1.2 试验原料、饲粮及配制

61 1.2.1 试验原料

62 试验所用原料采集信息见表 1。

63 表 1 原料信息

64 Table 1 Feedstock information

样品名称 Sample name	英文名称 English name	来源 Source	品种 Variety	收获时间 Harvest time
稻秸 RS	rice straw	天津宝坻	华粳籼 74	完熟期
全株青贮玉米 WPCS	whole-plant corn silage	北京密云	郑单 958	蜡熟期
玉米秸秆青贮 CSS	corn stalk silage	北京大兴	农华 816	蜡熟期
玉米秸秆 CS	corn stalks	北京大兴		收获期
黄豆秸 SS	soybean straw	山东济宁嘉祥	中黄 13	收获期
小麦秸秆 WS	wheat straw	山东济宁嘉祥	济麦 22	收获期
地瓜秧 SPV	sweet potato vine	北京大兴	206	收获期
苜蓿 AH	alfalfa hay	美国加州		孕蕾末期
花生秧 PV	peanut vine	山东济宁嘉祥	豫花 9326	收获期
羊草 LC	*Leymus chinesis*	吉林大安		孕穗至开花初期

65 1.2.2 试验饲粮及配制

66 参照 NRC（2007）[11]40～50 kg 成年肉用公羊 1.3 倍维持需要饲喂标准配制基础饲粮（BD）

67 和 10 种试验饲粮，试验饲粮分别由 10 种原料以 20%[1]的比例替代基础饲粮组成，即羊草（LC）、

68 苜蓿（AH）、全株玉米青贮（WPCS）、玉米秸秆青贮（CSC)、地瓜秧（SPV）、花生秧（PV）、

69 玉米秸秆（CS）、豆秸（SS）、小麦秸秆（WS）、稻秸（RS）分别替代 20%基础饲粮。饲粮

70 组成及营养水平见表 2。

71 表 2 饲粮组成及营养水平（干物质基础）

72 Table 2 Composition and nutrient levels of diets (DM basis) %

项目 Items	饲粮 Diets										
	基础饲粮 BD	全株玉米青贮 WPCS	苜蓿 AH	玉米秸秆 CS	地瓜秧 SPV	豆秸 SS	小麦秸秆 WS	玉米秸青贮 CSC	稻草秸秆 RS	花生秧 PV	羊草 LC
原料 Ingredients		19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50	19.50
玉米 Corn	28.54	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83	22.83
豆粕 Soybean meal	18.24	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59	14.59
羊草 LC	50.68	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54	40.54

磷酸氢钙 $CaHPO_4$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
石粉 $CaCO_3$	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80
食盐 NaCl	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
预混料 Premix1)	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels2)											
干物质 DM	92.58	90.72	92.13	88.96	89.90	89.04	89.54	90.82	92.53	92.25	92.65
有机物 OM	92.78	91.77	91.80	91.96	91.08	91.21	91.18	90.95	91.27	91.08	92.72
总能 GE	17.75	17.49	17.96	17.64	18.03	17.44	17.40	17.45	17.34	17.27	17.83
粗蛋白质 CP	14.87	12.51	14.69	13.53	14.05	13.13	12.35	12.33	12.56	12.79	12.74
中性洗涤纤维 NDF	45.17	47.77	44.99	50.84	48.93	51.45	48.29	48.39	47.82	48.47	46.82
酸性洗涤纤维 ADF	23.49	26.99	26.45	26.30	25.83	27.02	27.21	25.17	23.75	27.23	29.50
粗脂肪 EE	2.04	1.73	2.36	1.72	1.92	1.38	1.89	2.18	1.68	2.27	2.31

73 1) 预混料为每千克饲粮提供 The premix provided the following per kg of diets：Cu 16.0 mg，Fe 60.0 mg，

74 Mn 40.0 mg，Zn 70.0 mg，I 0.80 mg，Se 0.30 mg，Co 0.30 mg，VA 12 000 IU，VD 5 000 IU，VE 50.0 mg。

75 2) 实测值 Measured values。

76 1.3 试验方法及操作

77 试验期 19 d，分为预试期 10 d，正试期 9 d，其中前 3 d 为呼吸代谢试验，后 6 d 为消化

78 代谢试验。

79 1.3.1 消化代谢试验

80 在预试期前通过饲喂基础饲粮确定日增重为 0 g/d 的维持需要采食量，试验羊采用限饲

81 的方法（每种饲粮 1 200 g/d），每天 08：00、18:00 各喂 600 g 饲粮，全天自由饮水。消化

82 代谢试验采用由中国农业科学院饲料研究所设计并制作的代谢笼，含有能将粪便与尿液自动

83 分离的装置，采用全收粪尿法收集粪、尿。每天晨饲前先将代谢笼隔粪板上、漏斗里的羊粪

84 捡拾干净，在将收粪袋取下并换新以便第 2 天样品的收集。将收粪袋中羊毛等杂物捡出，称

85 量并记录每只羊排粪量，按每天排粪量的 10%取样，将每只羊 6 d 的粪样混合冷冻保存。在

86 试验结束时，将收集的每只羊粪混合后置于 65 ℃烘箱中 48 h，回潮 48 h 后称重用于计算初

87 水份含量[1]，在将粪样粉碎过 40 目网筛制成分析样品，以备分析检测。用盛有 100 mL 10%

88 H_2SO_4 的塑料桶收集尿液，稀释至 5 L（防止贮存中有尿酸沉淀），对稀释尿液充分混合，用

89 纱布过滤后每天取样 20 mL，将每只羊 6 d 的尿样混合后于-20 ℃冰箱保存。

90 1.3.2 呼吸代谢试验

91 呼吸代谢试验由密闭呼吸箱连接 Sable 开路式循环气体测定装置、LGR 气体分析仪（购

92 于美国 SABLE SYSTEMS INTERNATIONAL 公司，产于 North Las Vegas）和配套的计算机

93 程序共同完成。此系统原理是通过红外型甲烷分析仪（LGR）检测进出密闭呼吸箱的甲烷浓

94 度，以及一定时间内流通呼吸箱的气体体积，从而计算出该时间内动物的甲烷实际排放量、
95 二氧化碳排放量、氧气消耗量。此系统连接 6 个密闭呼吸箱，可以同时对 6 只动物的呼吸状
96 态连续不间断地进行测定和记录。试验期间将试验羊分 11 批次移入密闭呼吸箱，每批次测
97 定同一处理的 6 只试验羊，进入此密闭呼吸箱后适应 24 h，测定随后 48 h 的甲烷排放量用
98 于计算饲粮 ME。

99 1.4 测定指标和方法

100 1.4.1 营养物质消化率

101 饲粮、原料和粪样中的干物质（DM）、粗蛋白质（CP）、粗脂肪（EE）、中性洗涤纤维
102 （NDF）、酸性洗涤纤维（ADF）、粗灰分（ash）、有机物（OM）和总能（GE），以及原料
103 中钙（Ca）和（P）含量测定依据《饲料分析及饲料质量检测技术》[12]。

104 1.4.2 ME

105 尿能（UE）：取 5 块定量滤纸分别测定能值，计算出滤纸的平均能值。将 10 mL 尿液分
106 多次滴在滤纸上，65 ℃烘干后于 Parr6 400 氧弹式量热仪中测定，得到滤纸和尿液的总能。

107 UE=滴加尿液的滤纸能值—滤纸能值；

108 甲烷能（CH_4-E，MJ）=甲烷排放量（L）×39.54/1 000[13]；

109 ME=GE-粪能（FE）－UE－CH_4-E。

110 1.5 计算公式

111 饲粮及原料养分消化率计算方法参照 Adeola[14]的公式：

112 饲粮养分消化率（%）=（食入的养分含量-粪中该养分含量）/食入的养分含量；

113 原料养分消化率（%）=[饲粮养分消化率-（1-X）×基础饲粮中该养分消化率]/X。

114 式中：X 为待测原料替代基础饲粮比例（%）。

115 套算法测定原料能值的计算参照刘德稳[5]、陶春卫[8]的公式：

116 能值（MJ/kg）=[试验饲粮能值-（1-X）×基础饲粮能值]/X。

117 式中：X 为待测原料替代基础饲粮比例；能值可为 DE、ME。

118 1.6 统计分析

119 试验数据采用 Excel 进行初步处理后，采用 SAS 9.2 统计软件中的 Correlate 过程对 10
120 种粗饲料的概略养分含量、营养物质消化率、能值等进行相关分析，用 Regression 过程进行
121 回归分析，建立预测方程。

122 2 结 果

123 2.1 粗饲料营养水平

124 10 种粗饲料概略养分含量见表 3。

125 表 3 粗饲料概略养分含量（干物质基础）

126 Table 3 Common nutrient contents of roughages (DM basis) %

项目 Items	全株玉米青贮 WPCS	苜蓿 AH	玉米秸秆 CS	地瓜秧 SPV	豆秸 SS	小麦秸秆 WS	玉米秸秆青贮 CSC	稻草秸秆 RS	花生秧 PV	羊草 LC
干物质 DM	91.39	92.55	90.63	91.78	89.85	90.46	91.47	91.00	90.05	91.40
有机物 OM	91.03	91.61	89.18	90.36	89.10	88.44	89.04	88.93	89.31	89.69
总能 GE/(MJ/kg)	17.49	17.84	16.56	17.42	16.50	16.09	16.70	16.54	16.71	16.84
粗蛋白质 CP	8.79	17.85	6.77	14.42	5.42	4.48	7.92	5.98	8.18	8.26
中性洗涤纤维 NDF	63.90	55.00	76.73	57.09	73.90	77.39	71.53	75.28	60.14	64.41
酸性洗涤纤维 ADF	39.11	34.35	46.97	39.49	52.78	44.92	42.17	46.13	42.93	42.31
粗脂肪 EE	2.81	2.45	1.71	1.81	1.44	2.01	2.15	1.31	2.04	1.91
钙 Ca	0.45	1.49	0.55	1.42	0.45	0.18	0.31	0.08	0.98	0.46
磷 P	0.24	0.31	0.12	0.15	0.11	0.06	0.10	0.06	0.32	0.19

127 实测值 Measured values。

128 2.2 粗饲料的营养物质消化率及能值

129 通过消化代谢试验、呼吸代谢试验实测饲粮各营养物质消化率以及 FE、UE、CH_4-E、

130 DE、ME，结合经典套算法公式得到 10 种原料营养物质消化率和 DE 及 ME（表 4）。10 种

131 粗饲料营养物质消化率、DE 和 ME 存在显著性差异（P<0.05）。

132 表 4 粗饲料的营养物质消化率及能值(干物质基础)

133 Table 4 Digestibility and energy values of nutrients of roughages （DM basis）

项目 Items	消化率 Digestibility/%					能值 Energy values/（MJ/kg）	
	干物质 DM	有机物 OM	粗蛋白质 CP	总能 GE	中性洗涤纤维 NDF	消化能 DE	代谢能 ME
玉米秸秆 CS	43.47^{ab}	44.13^{d}	47.06^{cd}	44.69^{bc}	35.30^{cd}	5.77^{ed}	4.96^{f}
羊草 LC	48.26^{bcd}	51.85^{bc}	51.90^{bcd}	$47.57b^{c}$	46.52^{ab}	8.70^{c}	7.02^{cd}
全株玉米青贮 WPCS	52.40^{ab}	49.62^{bcd}	54.24^{bc}	57.46^{a}	49.21^{a}	8.45^{c}	7.29^{bc}
玉米秸青贮 CSC	45.57^{bcd}	43.28^{d}	43.63^{cd}	50.37^{b}	44.596^{abc}	6.77^{d}	5.91^{ed}
苜蓿 AH	58.35^{a}	61.31^{a}	68.83^{a}	63.52^{a}	51.04^{a}	11.71^{a}	9.77^{a}
地瓜秧 SPV	51.12^{abc}	55.43^{ab}	63.02^{ab}	59.52^{a}	45.42^{abc}	10.09^{b}	8.41^{b}
豆秸 SS	46.92^{bcd}	49.49^{bcd}	43.23^{cd}	42.46^{c}	40.80^{abcd}	4.82^{e}	4.15^{f}
花生秧 PV	56.28^{a}	56.81^{ab}	59.82^{ab}	50.63^{b}	47.71^{ab}	8.36^{c}	6.89^{cd}
小麦秸秆 WS	43.73^{cd}	49.62^{bcd}	47.74^{cd}	42.19^{c}	32.96^{d}	4.93^{e}	4.13^{f}
稻草秸秆 RS	42.61^{d}	46.03^{cd}	41.31^{d}	41.20^{c}	37.32^{bcd}	6.08^{d}	5.08^{ef}
标准误 SEM	1.010	0.996	1.596	1.172	1.239	0.303	0.252
P 值 *P*-value	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	<0.001	<0.001

134 同列数据肩标不同字母表示差异显著（P<0.05），无字母或字母相同表示差异不显著（P>0.05）。下表

135 同。

136 Values in the same column with different letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with

137 the same or no letter superscripts mean no significant difference （P>0.05）. The same as below.

138 2.3 粗饲料概略养分含量与消化率的相关关系

139 粗饲料概略养分含量与消化率的相关性分析结果见表 5。粗饲料中 DM、OM、CP、GE、

140 NDF 消化率与 DM、OM、CP、NDF、ADF 含量均达到显著或极显著相关(P<0.05 或 P<0.01)，

141 与 EE 含量无显著相关性（P>0.05）。

142 表 5 粗饲料概略养分含量与消化率的相关关系

143 Table 5 Correlation coefficient between common nutrient contents and nutrient digestibility of roughages

项目 Items	消化率 Digestibility				
	干物质 DM	有机物 OM	粗蛋白质 CP	总能 GE	中性洗涤纤维 NDF
干物质 DM	0.390*	0.382*	0.553*	0.762**	0.548*
有机物 OM	0.586*	0.572*	0.596*	0.703**	0.784**
总能 GE	0.748**	0.676**	0.750**	0.932**	0.820**
粗蛋白质 CP	0.728**	0.721**	0.866**	0.887**	0.672**
中性洗涤纤维 NDF	-0.872**	-0.852**	-0.913**	-0.823**	-0.815**
酸性洗涤纤维 ADF	-0.686**	-0.645**	-0.793**	-0.883**	-0.699**
粗脂肪 EE	0.026	0.108	0.006	-0.018	0.039

144 *表示显著相关（P<0.05），**表示极显著相关（P<0.01）。表 7 同。

145 *meant significant correlation （P<0.05），** meant significant correlation （P<0.01）. The same as Table 7.

146 为进一步通过概略养分含量来预测粗饲料营养物质消化率，根据相关性的分析结果，将

147 粗饲料概略养分分别与 DM、OM、GE、CP、NDF 的消化率进行回归分析。建立概略养分

148 含量预测粗饲料消化率的方程（表 6），可以看出 NDF 是干物质消化率（DMD）、有机物消

149 化率（OMD）、蛋白质消化率（CPD）、能量消化率（ED）、中性洗涤纤维消化率（NDFD）

150 的预测方程中的重要因素，还可以看出多元预测方程式的决定系数（R^2）较高，ED 的五元

151 方程式，R^2 达到 0.974。

152 表 6 概略养分含量（%）预测粗饲料营养物质消化率（%）的方程

153 Table 6 Prediction equations for nutrient digestibility （%） using common nutrient contents （%） of roughage

项目 Items	预测方程 Prediction equation	决定系数 R^2	P 值 P-value
干物质消化率 DMD	DMD=87.906-0.573NDF	0.760	<0.001
	DMD=37.773-0.451NDF+2.477GE	0.787	<0.001
	DMD=28.237-0.644NDF+4.140GE-0.626CP	0.833	<0.001

有机物消化率 OMD	OMD=91.324-0.590NDF	0.725	<0.001
	OMD=96.464-0.132CP-0.648NDF	0.728	<0.001
粗蛋白质消化率 CPD	CPD=121.043-1.012NDF	0.834	<0.001
	CPD=96.559-0.734NDF+0.636CP	0.853	<0.001
	CPD=101.551+0.252CP-0.699NDF+0.733GE-0.380ADF	0.873	<0.001
能量消化率 ED	ED=-98.799+8.426GE+0.735CP	0.924	<0.001
	ED=99.013+9.588GE+0.157CP-0.457ADF-1.981OM-0.213NDF	0.974	<0.001
	ED=104.933+9.986GE-0.482ADF-2.060OM-0.258NDF	0.973	<0.001
中性洗涤纤维消化率 NDFD	NDFD=-144.113-0.389NDF+2.375OM	0.771	<0.001
	NDFD=-110.266+1.308OM-0.318NDF+3.395GE	0.800	<0.001
	NDFD=-37.883+8.141GE-0.688NDF-1.112CP	0.878	<0.001

154 2.4 粗饲料 DE 和 ME 与概略养分含量的相关关系

155 粗饲料 DE 和 ME 与概略养分含量的相关性分析结果见表 7。粗饲料 DE 和 ME 与 DM、
156 OM、GE、CP 含量均达到极显著正相关（P<0.01），与 NDF、ADF 含量达到极显著负相关
157 （P<0.01），而与 EE 含量无显著相关性（P>0.05）。

158 表 7 粗饲料 DE 和 ME（MJ/kg）与概略养分含量(%)的相关关系

159 Table 7 Correlation coefficient between DE or ME （MJ/kg） and common nutrient contents (%) of roughages

项目 Items	干物质 DM	有机物 OM	总能 GE	粗蛋白质 CP	中性洗涤纤维 NDF	酸性洗涤纤维 ADF	粗脂肪 EE	消化能 DE	代谢能 ME
干物质 DM	1								
有机物 OM	0.770**	1							
总能 GE	0.762**	0.816**	1						
粗蛋白质 CP	0.801**	0.667**	0.802**	1					
中性洗涤纤维 NDF	-0.567**	-0.66**	-0.709**	-0.873**	1				
酸性洗涤纤维 ADF	-0.853**	-0.715**	-0.801**	-0.769**	0.729**	1			
粗脂肪 EE	-0.205	0.134	0.126	-0.207	0.088	0.200	1		
消化能 DE	0.766**	0.813**	0.860**	0.913**	-0.940**	-0.886**	0.112	1	
代谢能 ME	0.778**	0.806**	0.886**	0.918**	-0.927**	-0.897**	0.114	0.997**	1

160 根据本试验 10 种粗饲料能值与其概略养分含量进行逐步回归分析，建立常见 10 种粗
161 饲料能值预测方程见表 8。从方程式可见，单用 NDF 预测 DE 和 ME 的预测方程 R^2 均达到
162 0.85 以上。多元回归方程式的预测值更接近于实测值。

163 表 8 概略养分含量(%)预测粗饲料 DE 和 ME(MJ/kg)的方程

164 Table 8 Prediction equations for DE and ME (MJ/kg) using common nutrient contents (%) of roughages (n=60)

项目 Items	预测方程 Prediction equation	决定系数 R^2	P 值 P value
消化能 DE	DE=25.106-0.257NDF	0.883	<0.001
	DE=16.960-0.165NDF+0.212CP	0.919	<0.001

	DE=-42.614+0.634OM+0.170CP-0.123NDF	0.839	<0.001
	DE=-13.202-0.139NDF-0.121ADF+0.314OM+0.407GE+0.38CP	0.993	<0.001
	ME=20.450-0.206NDF	0.859	<0.001
	ME=-33.840-0.156NDF+0.565OM	0.926	<0.001
代谢能 ME	ME=-31.002-0.097NDF+0.474OM+0.154CP	0.953	<0.001
	ME=-6.943-0.101NDF+0.704GE-0.101ADF+0.138OM+0.032CP	0.994	<0.001
	ME=0.221+0.812DE	0.994	<0.001

165 将本试验得到的 ME 与概略养分含量相关关系的三元方程
166 ME=-31.002-0.097NDF+0.474OM+0.154CP 和五元方程
167 ME=-6.943-0.101NDF+0.704GE-0.101ADF+0.138OM+0.032CP 与本试验条件下依托套算法所
168 得的 ME 进行比较，结果见表 9。可以看出，由 ME 的三元方程得出的玉米秸秆、羊草、全
169 株玉米青贮、玉米秸秆青贮、苜蓿、地瓜秧、豆秸、花生秧、小麦秸秆、稻草秸秆的 ME
170 预测值与套算法测定值之间偏差分别为-1.85%、-7.34%、0.14%、-7.85%、0.71%、1.18%、
171 15.31%、-1.92%、-0.73%、-6.50%，而采用五元预测方程得到的 ME 与套算法测定值之间偏
172 差分别为-4.42%、-3.54%、6.66%、-0.68%、0.41%、1.06%、4.60%、1.57%、5.71%、-3.67%。
173 与套算法测定值之间偏差，五元 ME 预测方程除个别略高于三元 ME 预测方程外，偏差整体
174 较低，预测值更接近于套算法测定值。

175 表 9 粗饲料 ME 预测值与套算值的比较

176 Table 9 Comparison between predicted value and substitution value of ME

项目 Items	套算值 Substitution value/(MJ/kg)	三元方程 Three elements equation		五元方程 Five elements equation	
		预测值 Predicted value/(MJ/kg)	与套算值偏差 Deviation with substitution value/%	预测值 Predicted value/(MJ/kg)	与套算值偏差 Deviation with substitution value/%
玉米秸秆 CS	4.96	4.87	-1.85	4.75	-4.42
羊草 LC	7.02	6.54	-7.34	6.78	-3.54
全株玉米青贮 WPCS	7.29	7.30	0.14	7.81	6.66
玉米秸秆青贮 CSC	5.91	5.48	-7.85	5.87	-0.68
苜蓿 AH	9.77	9.84	0.71	9.81	0.41
地瓜秧 SPV	8.41	8.51	1.18	8.50	1.06
豆秸 SS	4.15	4.90	15.31	4.35	4.60
花生秧 PV	6.89	6.76	-1.92	7.00	1.57
小麦秸秆 WS	4.13	4.10	-0.73	4.38	5.71
稻草秸秆 RS	5.08	4.77	-6.50	4.90	-3.67

177 3 讨 论

178 3.1 粗饲料消化率与概略养分含量的关系

179 饲粮中各营养物质的消化率是评定其营养价值的重要参数，影响消化率的因素很多，主

180 要是动物、饲粮组成、饲粮的加工调制、饲养水平等。任何一种粗饲料的消化率与利用率均
181 是动物与饲料因素相互作用的结果[15]。分析本试验条件，除了基础饲粮中替代的部分，其
182 他部分均可视为一致，因此消化率的差异的主要原因是原料概略养分的不同造成的：比如
183 CP 含量，苜蓿和地瓜秧中的含量较高，其 CP 消化率显著地高于其他几种低质的作物秸秆；
184 本试验结果证实 NDF 含量影响营养物质的消化率，饲粮中随着 NDF 含量增加，其 OMD 下
185 降[16]，可能的原因是纤维水平的提高，使蛋白质在消化道中的排空速度也在加快，这无疑
186 也降低了其被酶作用的时间以及被肠道吸收的几率。就饲料因素而言，不同品种饲料，或同
187 种饲料不同产地、不同收获期、不同加工处理等均会导致消化率出现较大的差异[17]。已有
188 研究表明，消化率与饲粮营养物质含量之间存在着显著的回归关系[18-21]。而 Menke 等[22]早
189 在 1979 年提出人工瘤胃产气法，表明样品 $GP_{24\ h}$ 与体内消化率测定值之间呈正相关关系，
190 刘洁[10]采用精粗比不同的 11 种饲粮得到饲粮有机物体外消化率（IVOMD）与 $GP_{24\ h}$ 的关系
191 为：IVOMD=8.803+1.197$GP_{24\ h}$（R^2=0.894）；与 NDF 含量的预测模型为：
192 IVOMD=88.578-0.734NDF（R^2=0.921）；本试验中得到 OMD 预测模型为
193 OMD=91.324-0.590NDF（R^2=0.725）。本试验中 DMD=87.906-0.537NDF（R^2=0.760）。而前
194 人建立起主要以体外法(产气法)测定的参数(产气量、消化率)为预测因子的模型[23]，使用体
195 外法所得的参数，由于试验方法本身就无法保证跟瘤胃真实内环境一致，所以方程的精准性
196 可质疑。另外鲜有的以体内法实测有效能值建立的这些配合饲粮有效能值预测模型，未必适
197 于生产配合饲粮的原料。因此本试验中依托套算法，分析了原料中营养物质消化率与其含量
198 的相关关系，发现各营养物质消化率与概略养分含量相关性较强的 3 个因子分别是：DMD
199 为原料中 NDF、CP、GE 含量，OMD 为 NDF、CP、GE 含量，CPD 为 NDF、CP、ADF 含
200 量，GED 为 GE、CP、ADF 含量，NDFD 为 GE、NDF、OM。各营养物质消化率与其 DM、
201 OM、CP、GE 含量成极显著正相关关系，而与 NDF、ADF 成极显著负相关关系。

202 3.2 粗饲料能值与概略养分含量的关系

203 动物为能而食，评定粗饲料的有效能值费时费力是一个复杂困难的过程，由于每一种
204 原料所含营养物质含量的差异，导致其有效能值不同，而对于肉羊来说，由于其采食的粗饲
205 料种类多样化和胃肠道特殊的结构，使得反刍动物粗饲料有效能值评定较于单胃动物来说更
206 为复杂，而目前普遍采用的利用饲粮中养分含量预测饲粮有效能值这一方法，由于构建模型
207 选用的预测因子的合理性保证了预测模型的客观性和可靠性，因此这一方法较为有效快捷，
208 适用于实际生产中[24-26]。对于单一粗饲料有效能值的预测多是采用体外参数与营养物质含量
209 建立的预测模型[7]。何亭漪[9]利用体外产气测定粗饲料的产气量，预测其 DOM 和 ME。孙

210 献忠[27]应用两级离体法测定了粗饲料的 DE、ME，表明原料中营养物质含量与 DE、ME 存
211 在明显的相关性，利用组合效应指数校正的原料能值预测方程比配合饲粮的预测方程的准确
212 性高。陶春卫[8]研究表明，ME 来评定粗饲料的价值结果与概略养分评定和 IVDMD 评定并
213 不相同，可能由于 ME 受到 GE 和 IVDMD 2 方面的影响，以致不同粗饲料的 GE、IVDMD
214 与 ME 并不是同步变化的。De Boever 等[28]发现 ADF 含量与体内 OMD 有关。本试验条件下
215 根据套算法的原则配制试验饲粮，借助 Sable 密闭呼吸箱式循环气体代谢系统，测定 10 种
216 肉羊常用粗饲料的 ME。本试验结果除了羊草、苜蓿、花生秧比袁翠林等[29]采用两级离体消
217 化法估算所得的原料的 DE 和 ME 高外，其余均较低。在营养价值评定中，体内法直接测定，
218 真实可靠，是校准其他方法结果的唯一方法，本试验采用的是体内法，能够真实反映饲料在
219 动物体内的参加消化代谢的过程。试验中通过物质消化代谢试验和气体代谢，客观地测定出
220 概略养分含量和能量的消化与代谢，得到实际测定的能量值。在反刍动物方面利用体内法建
221 立的能量预测模型研究较少，近年来刘洁等[23]通过测定 11 种不同精粗比饲粮营养物质消化
222 率和有效能值，并进行有效能值与概略养分含量的线性回归分析，建立了配合饲粮 ME 的预
223 测模型，预测方程为：ME（MJ/kg）=50.245-0.136NDF-0.394OM-0.012CP(R^2=0.901)。Noblet
224 等[30]研究表明，饲粮所建立的预测方程并不适用于单一原料。本试验中建立的 ME 预测五元
225 方程式：ME（MJ/kg）=-6.943-0.101NDF+0.704GE-0.101ADF+0.138OM+0.032CP，R^2 达到
226 0.994，足以说明这一预测模型的可靠性；与 ME 相关性最高的预测因子亦为 NDF，预测方
227 程为：ME（MJ/kg）=20.450-0.206NDF(R^2=0.859)。另建了用 DE 预测 ME 的预测方程，
228 ME=0.221+0.812DE（R^2=0.994）不难看出方程常数项较小，可认为 DE 转化为 ME 的效率约
229 是 0.81，而与 NRC（2007）[11]中 ME=0.82DE 相比较，虽然 DE 前面的系数有所偏差，但加
230 上常数，其结果与 0.82DE 十分接近。通过与 NRC 的比较，侧面验证了本试验所建立预测
231 方程的客观准确性。

232 4 结 论

233 ① 可以通过概略养分预测粗饲料营养物质消化率，ED 的预测方程为：
234 ED(%)=99.013+9.588GE+0.157CP-0.457ADF-1.981OM-0.213NDF（R^2=0.974，n=60，P<0.01）。
235 ② 可以通过概略养分预测粗饲料有效能值。随着预测因子的增加，方程精确性有所提
236 高，ME 的预测方程为：ME（MJ/kg）
237 =-6.943-0.101NDF+0.704GE-0.101ADF+0.138OM+0.032CP（R^2=0.994，n=60，P<0.01）。

238 参考文献：

239 [1] 赵明明,杨开伦,邓凯东,等.直接法与替代法测定羊草对肉用绵羊代谢能的比较研究[J].动

240 物营养学报,2016,28(2):436–443.
241 [2] NRC.Nutrient requirements of swine[S].11th ed.Washington,D.C.:National Academy
242 Press,2012.
243 [3] 桓宗锦.肉鸡玉米和豆粕净能的测定及其预测模型的建立[D].硕士学位论文.雅安:四川农
244 业大学,2009.
245 [4] 李婷婷.玉米 DDGS 营养价值预测模型研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学
246 院,2013.
247 [5] 刘德稳.生长猪常用七种饲料原料净能预测方程[D].博士学位论文.北京:中国农业大
248 学,2014.
249 [6] HUANG Q,SHI C X,SU Y B,et al.Prediction of the digestible and metabolizable energy
250 content of wheat milling by-products for growing pigs from chemical composition[J].Animal Feed
251 Science and Technology,2014,196:107–116.
252 [7] 张吉鹍.粗饲料消化率及其代谢能转化效率的研究进展[J].浙江畜牧兽医,2004(2):6–8.
253 [8] 陶春卫.反刍动物常用粗饲料营养价值评定及其有效能值预测模型的建立[D].硕士学位
254 论文.大庆:黑龙江八一农垦大学,2009.
255 [9] 何亭漪.不同粗饲料在绵羊瘤胃和体外降解规律的研究及代谢能数学预测模型的建立[D].
256 硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2013.
257 [10] 刘洁.肉用绵羊饲料代谢能与代谢蛋白质预测模型的研究[D].博士学位论文.北京:中国
258 农业科学院,2012.
259 [11] NRC.Nutrient requirements of small ruminants:sheep,goats,cervids,and new world
260 camelids[S].Washington,D.C.:National Academy Press,2007.
261 [12] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].北京:中国农业大学出版社,2010.
262 [13] 杨嘉实,冯仰廉.畜禽能量代谢[M].北京:中国农业出版社,2004.
263 [14] ADEOLA O.Digestion and balance techniques in pigs[M]//LEWIS A J,SOUTHERN L
264 L.Swine nutrition.2nd ed.Washington,D.C.:CRC Press,2001:903–916.
265 [15] 张吉鹍,邹庆华,包赛娜.反刍动物饲料间消化道层次的组合效应及其调控[J].饲料与畜
266 牧,2009(4):26–30.
267 [16] 杨凤.动物营养学[M].北京:中国农业出版社,2000.
268 [17] 邓卫东,席冬梅,毛华明.云南省反刍家畜主要饲料营养价值评价[J].黄牛杂
269 志,2002,28(1):23–27.

270 [18] ADESOGAN A T,OWEN E,GIVENS D I.Prediction of the *in vivo* digestibility of whole crop
271 wheat from *in vitro* digestibility,chemical composition,*in situ* rumen degradability,*in vitro* gas
272 production and near infrared reflectance spectroscopy[J].Animal Feed Science and
273 Technology,1998,74(3):259–272.
274 [19] NOUSIAINEN J,RINNE M,HELLÄMÄKI M,et al.Prediction of the digestibility of primary
275 growth and regrowth grass silages from chemical composition,pepsin-cellulase solubility and
276 indigestible cell wall content[J].Animal Feed Science and Technology,2003,110(1/2/3/4):61–74.
277 [20] AMMAR H,LÓPEZ S,GONZÁLEZ J S,et al.Seasonal variations in the chemical composition
278 and *in vitro* digestibility of some Spanish leguminous shrub species[J].Animal Feed Science and
279 Technology,2004,115(3/4):327–340.
280 [21] OWENS F N,SAPIENZA D A,HASSEN A T.Effect of nutrient composition of feeds on
281 digestibility of organic matter by cattle:a review[J].Journal of Animal
282 Science,2010,88(Suppl.13):E151–E169.
283 [22] MENKE K H,RAABA L,SALEWSKI A,et al.The estimation of the digestibility and
284 metabolizable energy content of ruminant feedingstuffs from the gas production when they are
285 incubated with rumen liquor *in vitro*[J].The Journal of Agricultural Science,1979,93(1):217–222.
286 [23] 刘洁,刁其玉,赵一广,等.肉用绵羊饲料养分消化率和有效能预测模型的研究[J].畜牧兽医
287 学报,2012,43(8):1230–1238.
288 [24] THERIEZ M,CASTRILLO C,VILLETTE Y.Influence of metabolizable energy content of the
289 diet and of feeding level on lamb performances II.Utilization of metabolizable energy for growth
290 and fattening[J].Livestock Production Science,1982,9(4):487–500.
291 [25] DEAVILLE E R,HUMPHRIES D J,GIVENS D I.Whole crop cereals:2.Prediction of apparent
292 digestibility and energy value from *in vitro* digestion techniques and near infrared reflectance
293 spectroscopy and of chemical composition by near infrared reflectance spectroscopy[J].Animal
294 Feed Science and Technology,2009,149(1/2):114–124.
295 [26] LOSADA B,GARCÍA-REBOLLAR P,ÁLVAREZ C,et al.The prediction of apparent
296 metabolisable energy content of oil seeds and oil seed by-products for poultry from its chemical
297 components,*in vitro* analysis or near-infrared reflectance spectroscopy[J].Animal Feed Science
298 and Technology,2010,160(1/2):62–72.
299 [27] 孙献忠.羊常用饲草的能量价值评定及其组合效应研究[D].硕士学位论文.北京:中国农

300 业科学院,2007.

301 [28] DE BOEVER J L,COTTYN B G,DE BRABANDER D L,et al.Prediction of the feeding value
302 of maize silages by chemical parameters,*in vitro* digestibility and NIRS[J].Animal Feed Science
303 and Technology,1997,66(1/2/3/4):211–222.

304 [29] 袁翠林,于子洋,王文丹,等.豆秸、花生秧和青贮玉米秸间的组合效应研究[J].动物营养学
305 报,2015,27(2):647–654.

306 [30] NOBLET J,PEREZ J M.Prediction of digestibility of nutrients and energy values of pig diets
307 from chemical analysis[J].Journal of Animal Science,1993,71(12):3389–3398.

308 Prediction and Equation of Effective Energy Values of Common Roughages for Mutton Sheep

309 ZHAO Mingming[1,2] YANG Kailun[1] MA Tao[2] MA Junnan[2] MAO Jianhong[2] ZHAO
310 Jiangbo[2] DENG Kaidong[3] DIAO Qiyu[1,2*]

311 (1. *College of Animal Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052, *China*; 2. *Feed*
312 *Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Feed*
313 *Biotechnology of the Ministry of Agriculture, Beijing* 100081, *China*; 3. *College of Animal Science,*
314 *Jinling Institute of Technology, Nanjing* 210038, *China*)

315 Abstract: This study aimed to investigate the effects of common nutrient contents determined by
316 on effective energy values and digestibility of 10 roughages commonly used for mutton sheep, and
317 develop prediction equations for metabolizable energy （ME） and nutrient digestibility based on
318 common nutrient contents. Nutrients digestibility, digestible energy （DE） and ME of 10
319 roughages were measured in digestion and metabolism trial and gas metabolism trial using
320 substitution method. The optimal prediction paramteters were selected and equations for effective
321 energy values were established based on the results of common nutrient contents and digestibility,
322 DE and ME. The results showed as follows: there weresignificant differences of nutrient
323 digestibility and effective energy values among the 10 roughages (P<0.05). Digestibility of dry
324 matter (DM), organic matter (OM), gross energy (GE), crude protein (CP) and neutral detergent
325 fiber (NDF) were positively related to contents of DM, OM, GE and CP (P<0.01), but negatively
326 related to contents of NDF and acid detergent fiber (ADF) (P<0.01). DE and ME had positive
327 relationship with contents of DM, OM, GE and CP (P<0.01), but were negatively related to
328 contents of NDF and ADF (P<0.01). These results indicate that the nutrient digestibility could be

*Corresponding author, professor, E-mall: diaoqiyu@ caas.cn (责任编辑 王智航)

329 predicted based on common nutrient contents, and the equation for energy digestibility (ED) is as
330 follows: ED(%)=99.013+9.588GE+0.157CP-0.457ADF-1.981OM-0.213NDF(R^2=0.974, n=60,
331 P<0.01). The effective energy values can be predicted based on common nutrient contents, with
332 the increase of predictor number, prediction equation accuracy improves, and the equation for ME
333 is as follows: ME(MJ/kg)=-6.943-0.101NDF+0.704GE-0.101ADF+0.138OM+0.032CP (R^2=0.994,
334 n=60, P<0.01).
335 Key words: metabolizable energy; mutton sheep; roughage; prediction equation